

Research on structural lightweight of key parts in Energy absorption of auto-body based on crashworthiness simulation

Yu Zhang, Ping Zhu, Zhongqin Lin, Guanlong Chen
(Shanghai Jiao Tong University)

Abstract: It has been the core problem of the development of automotive industry to lighten automobiles, decrease fuel consumption and reduce pollution of waste gas. And the lightweight of auto-body is playing a key role in lightening automobiles. The technology of lightweight is presently at its first step in the country and it is in the case of structural lightweight. Based on crashworthiness simulation, this study presents the research with a typical MPV as the prototype on the structural lightweight of front side rails and the front end back plate, showing the analysis and comparison with original data that include the deformation of parts, the force to rigid wall of the full car, and the acceleration of the key point. Front side rails and front end back plate are key parts in energy absorption during the process of frontal crash. The study verifies the feasibility of the project in structural lightweight of parts and the effect of front side rails and the front end back plate is 9.11% and 22.88% respectively, which offers a feasible method in the development of research on structural lightweight.

Key words: Lightweight Finite element method Crashworthiness Front side rail Front end back plate

基于耐撞安全性的轿车车身关键吸能 件的结构轻量化研究

张宇, 朱平, 林忠钦, 陈关龙

(上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200030)

摘要: 减轻汽车质量、降低燃油消耗和减少排放污染成为汽车工业发展的核心问题, 车身的轻量化对于整车轻量化起着举足轻重的作用。本文以某型 MPV 车为例, 基于耐撞安全性仿真, 对车身的重要吸能件前纵梁(左、右)及散热器下横梁进行结构轻量化研究, 从整车的吸能、整车与刚性墙的碰撞力及关键点的加速度与原结构整车进行对比、分析和评价, 在保证原结构整车安全指标前提下, 实现零件轻量化, 散热器下横梁和前纵梁(左、右)的减重效果分别为 22.88%、9.11%。本课题的研究将为今后开展结构轻量化研究提供可借鉴的方法。

关键词: 轻量化 有限元法 耐撞性 前纵梁 散热器下横梁

1 前言

近年来, 随着世界汽车保有量与日俱增以及人们对汽车安全性、舒适性、环保性能要求的提高, 减轻汽车质量、降低燃油消耗和减少排放污染的任务显得尤为迫切, 节能成为

汽车工业发展的核心问题，汽车轻量化成为 21 世纪汽车技术的前沿和热点^[1]。

减轻汽车自重是节约能源和提高燃料经济性的最基本途径之一，据统计，汽车每减重 10%，油耗可降低 6%~8%^[2]。车身质量占汽车总质量的 30%~40%，因此车身的轻量化对于整车的轻量化起着举足轻重的作用。我国 2000 年轿车保有量约 650 万辆，2010 年预计将达到 2400 万辆，可见汽车减重对节能、改善环境的意义十分巨大。

世界主要汽车制造商非常重视汽车的轻量化，工业发达国家在汽车轻量化研究方面发展较快，预计 21 世纪的轿车平均自重约为 80 年代初的一半。我国在汽车轻量化研究方面处于起步阶段，必须大力开展汽车轻量化研究，以缩小与世界发达国家的差距。目前汽车轻量化研究方面的定性研究报道较多，很少有关于定量研究的文献报道。本文以某型 MPV 车为研究对象，从汽车安全性的角度，对左前纵梁、右前纵梁及散热器下横梁进行结构轻量化研究。采用显式有限元理论建立整车有限元模型，基于整车结构的耐撞安全性数值仿真，从整车吸能、整车与刚性墙的最大碰撞力及关键点的加速度各方面进行分析，以验证车身零件结构轻量化方案的可行性及轻量化结果的可靠性。

2 零件轻量化结构形式的确定及可行性分析

2.1 整车有限元模型

通过 IGES 图形数据交换格式将相关 CAD 模型转入有限元分析软件 HYPERMESH / LS-DYNA 中，整车碰撞有限元模型如图 1 所示，共有 129285 个单元，131649 个节点，模型中的单元类型包括六面体实体单元、板壳单元、梁单元、杆单元、弹簧单元和阻尼单元等，节点为常规节点和模拟部分焊点情况的带失效的固连。根据“汽车正面碰撞乘员保护的设计规则（CMVDR294）”，对正面碰撞刚性墙进行了数值仿真，并与该车型在清华大学安全与节能国家重点试验室的实车正面碰撞试验进行比较，仿真结果与试验结果吻合较好，说明整车有限元模型是可靠的，能够较好的反应实车试验的结果^[3]。故前纵梁及散热器下横梁的结构轻量化采用该模型进行研究。

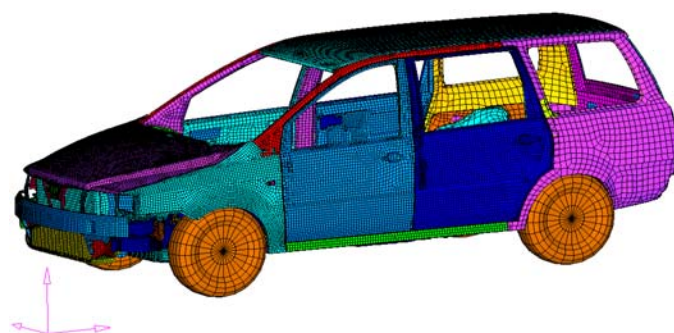


图 1 整车碰撞有限元模型

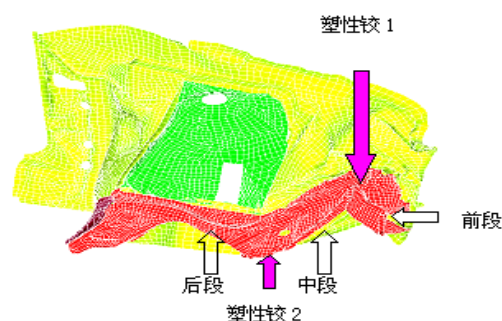


图 2 前纵梁的变形结果

2.2 前纵梁结构形式的确定

由于原 MPV 车前纵梁诱导槽的不合理布置，使得左、右前纵梁在整车正面碰撞中均发生了塑性铰式变形，虽然能够满足整车耐撞安全性，但这种变形形式影响了整车在碰撞过程中的吸能效果。前纵梁合理的变形形式应该是前部首先发生足够的压溃变形，既而中部发生弯曲变形，使得闭口帽型结构的吸能特性得到充分的发挥。

故确定轻量化结构形式的思想为：确定耐撞指数更高的结构，在保证原有吸能效果的前提下减薄壁厚以达到轻量化目的。由于前纵梁的设计已基本定型，考虑与其它零件的匹配以及避免发生干涉，所以应保证原前纵梁的尺寸不发生改变，通过在产生塑性铰的位置

增加板厚，设置加强筋等措施，避免纵梁的中部首先发生弯曲变形，有效提高其能量吸收能力^[4]。

通过对前纵梁结构的分析，决定在前纵梁中间部分加入加强板，同时去除原有的诱导槽，以防止其首先发生弯曲变形，使整个前纵梁产生合理的变形模式。另外，不同的截面加强形式对前纵梁的耐撞指数有很大的影响，图 3 为前纵梁的不同的截面加强形式。使用前纵梁简化的基本几何模型对四种不同截面的加强形式进行模拟对比分析^[5,6]，结果表明对角内板 2 的结构加强效果最为明显，耐撞指数最高。不同截面加强形式结构的耐撞指数比较见图 4。故前纵梁采用对角 2 型加强形式。

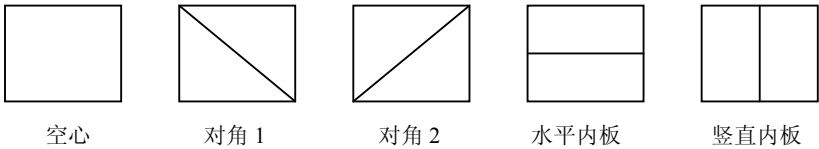


图 3 前纵梁结构不同的截面加强措施

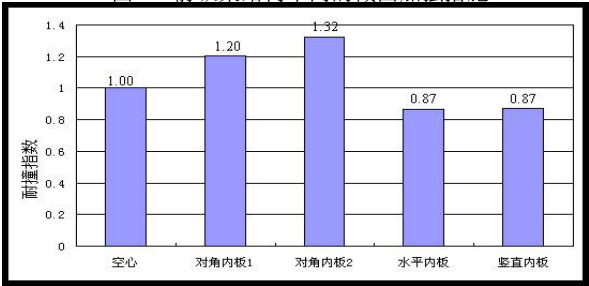


图 4 不同截面加强形式结构耐撞指数

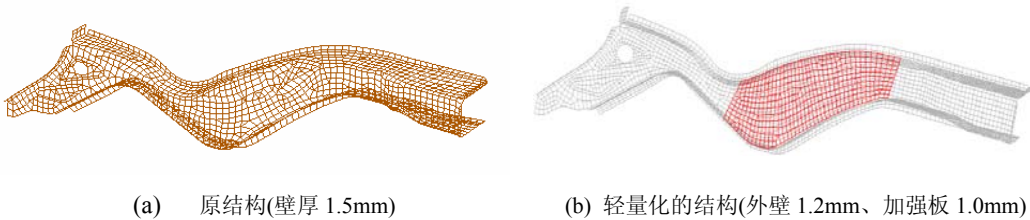


图 5 轻量化前后的前纵梁结构

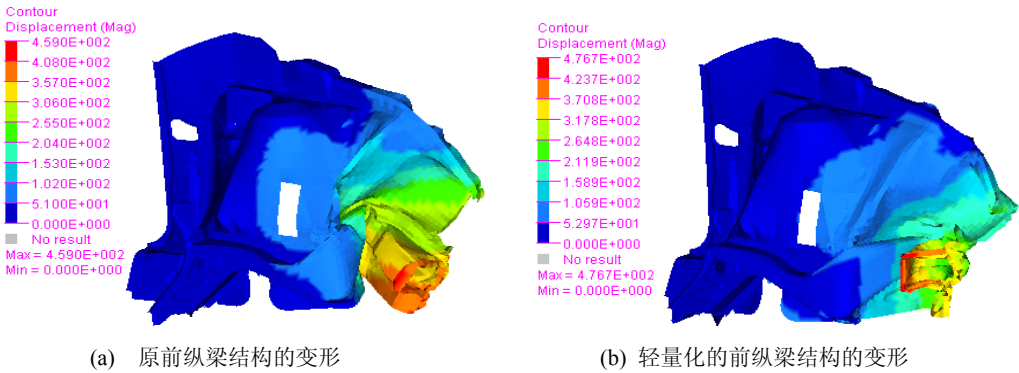


图 6 轻量化前后的前纵梁结构的变形

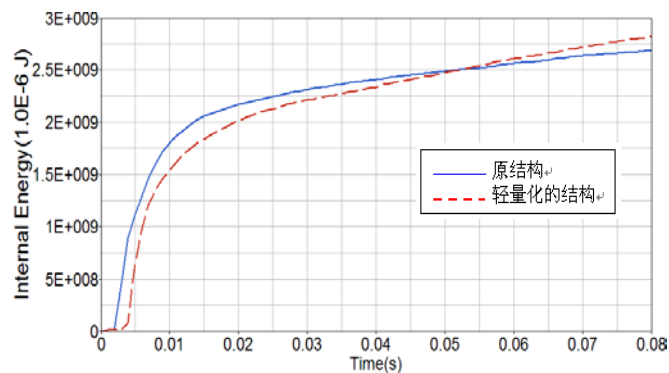


图7 轻量化前后的前纵梁结构吸能曲线对比

通过数值仿真试验分析，确定外壁与加强板壁厚分别为 1.2mm、1.0mm，与原结构的变形、吸能情况进行对比。从图 6、7 可以看出，碰撞过程中轻量化结构与原结构发生的最大位移及吸能曲线变化的趋势基本一致，且前者比后者吸能略多，而质量却比原结构要轻，这说明了前纵梁结构改进后可以实现轻量化，同时满足原来的吸能要求。

2.3 散热器下横梁结构的确定

散热器下横梁分为内板、外板，在碰撞过程中内板发生变形吸收绝大多数的能量，故在内板内部加入二个加强筋以增加整个下横梁结构的刚度，使得中间部分在碰撞过程中发生足够的压溃变形，吸收更多能量，在保证原有吸能的条件下减薄内、外板厚度达到减重目的。

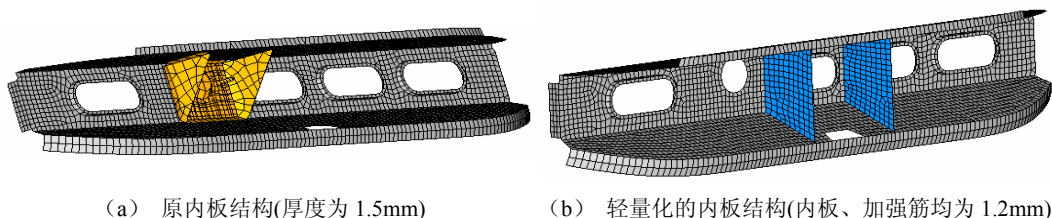


图8 轻量化前后散热器下横梁内板结构

同样通过数值仿真试验分析，轻量化结构中内板及加强筋的厚度取为 1.2mm，外板厚度取为 1.0mm，与原结构进行碰撞仿真对比。如图 9、10 所示，结果发现，碰撞过程中轻量化结构的变形小于原结构的变形，总体吸能量基本一致，重量比原结构要轻，这说明改进的下横梁内板结构可以达到轻量化目的。

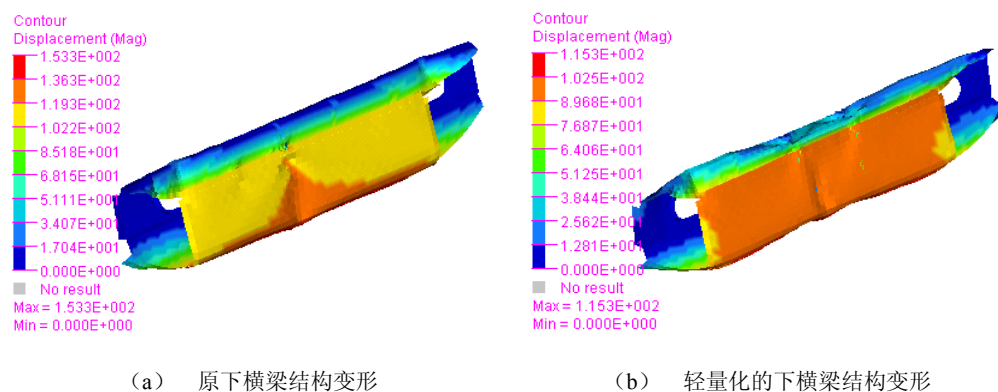


图9 轻量化前后的散热器下横梁结构的变形

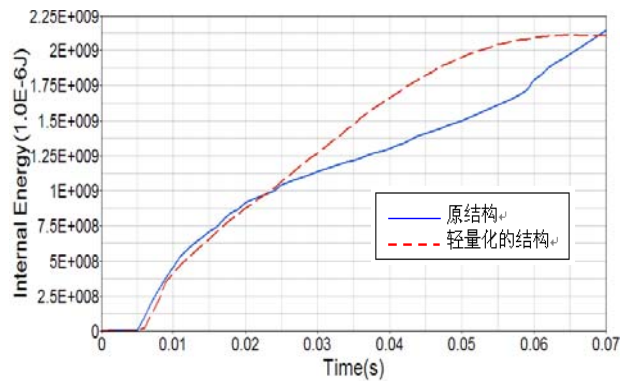


图 10 原散热器下横梁结构与轻量化结构的吸能曲线对比

3 整车耐撞安全性仿真及减重效果评价

3.1 整车耐撞安全性数值仿真与分析

将轻量化的左前纵梁、右前纵梁及散热器下横梁结构代替原零件放入整车有限元模型中，定义零件间的连接关系及边界条件。根据“汽车正面碰撞乘员保护设计规则（CMVDR294）”的要求，以 48.3km/h 的速度对整车正面碰撞刚性墙进行数值仿真。从零件变形、整车与刚性墙的碰撞力、关键零部件上点的加速度以及关键零部件吸能时间序列各方面分析、评价零件结构轻量化后对整车耐撞安全性能的影响。

从图 11、12 可以看出，轻量化的结构变形方式发生了改变，前纵梁的前部首先发生足够的压溃变形，继而中部发生弯曲变形；散热器下横梁的中部发生了足够的压溃变形；充分发挥了其在碰撞过程中的吸能特性，前后二种结构整车最大位移仅相差 70 毫米，可以保证变形都集中在车身前部的前半段而保证乘员舱不发生变形。

如图 13、图 14 所示，前后二种结构整车吸能情况曲线的变化情况基本吻合，说明了轻量化的结构满足原来吸能的要求。另外，轻量化结构的整车与刚性墙的最大碰撞力曲线与原结构整车的曲线形状基本一致，且峰值有所降低，这说明轻量化的结构使得整个车身前部的碰撞变形方式发生了一定的变化，充分发挥了吸能潜力，致使最大碰撞力值降低。

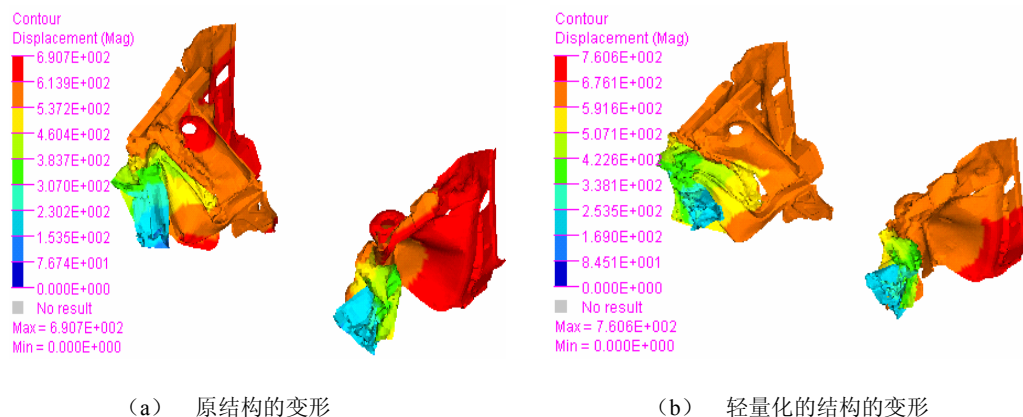


图 11 轻量化前后二种前纵梁结构的变形

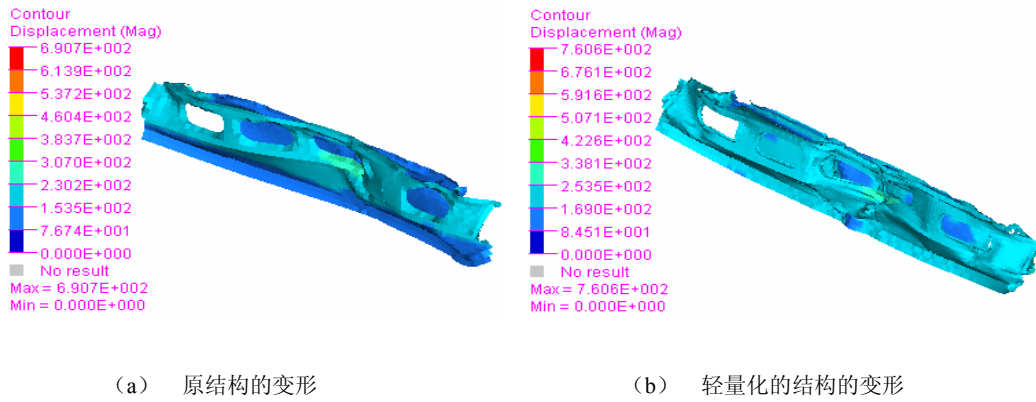


图 12 轻量化前后的散热器下横梁结构的变形

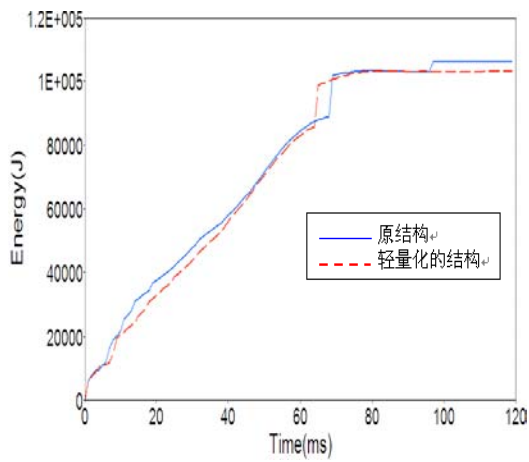


图 13 前后二种结构的整车吸能曲线

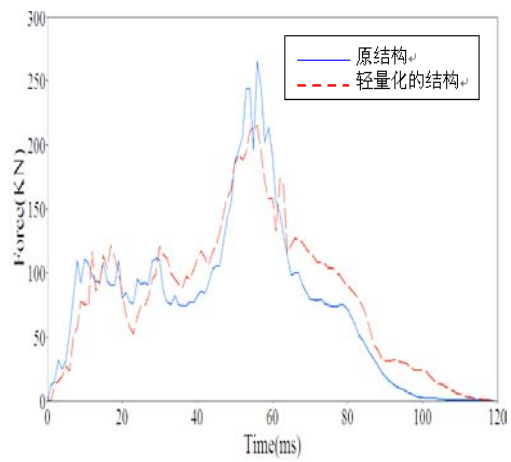


图 14 前后二种结构的整车与刚性墙碰撞力曲线

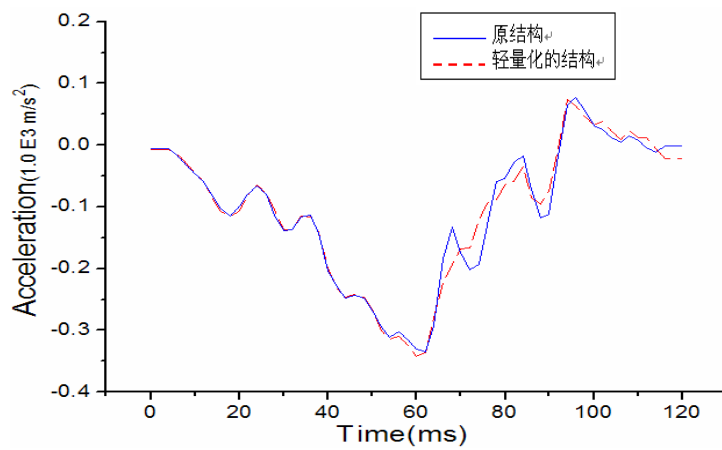


图 15 原结构与轻量化结构的整车车身 A 柱上一点加速度曲线对比

图 15 是原结构与轻量化结构的整车碰撞过程中车身 A 柱上一点的加速度变化曲线，可以看出，轻量化结构与原结构的加速度曲线变化趋势、峰值发生的时刻及大小基本一致，这说明轻量化的结构能够满足原有整车的安全指标。

3.2 轻量化减重效果评价

为了对前纵梁、散热器下横梁结构轻量化的减重效果进行评价，将轻量化前后结构的质量进行计算，计算结果如表 1 所示。从表 1 看出，前纵梁原结构重量为 6.806Kg，轻量化结构的重量为 6.196Kg，减重效果达到 9.11%；散热器下横梁原结构重量为 7.147，轻量化结构的重量为 5.512，减重效果为 22.88%。故散热器下横梁与前纵梁的结构轻量化效果是较为显著的。

表 1 结构轻量化前后质量比较

	原结构的零部件质量(Kg)	轻量化结构的零部件质量(Kg)	减重效果(%)
散热器下横梁	7.147	5.512	22.88
前纵梁（左、右）	6.806	6.196	9.11

4 结论

由于原结构整车正面碰撞过程中，车身重要吸能件前纵梁（左、右）和散热器下横梁的吸能能力没有很好发挥出来，因此通过合理优化结构以充分发挥其吸能特性，在保证原有吸能效果及整车各项安全性指标的前提下，减薄壁厚，以达到减重的目的。对轻量化的结构进行整车正面碰撞仿真，从整车吸能、整车与刚性墙碰撞力及关键点的加速度各方面与原整车各项指标对比、分析，进一步验证了轻量化方案的可行性及结果的可靠性，前纵梁（左、右）和散热器下横梁的减重效果分别为 9.11%、22.88%。本课题的研究为今后进一步开展车身结构轻量化的研究提供可借鉴的方法。

参考文献:

1. 大须贺龙治. 自动车の燃费动向と轻量化. 自动车技术, 2001, (4): 4-8.
2. Joseph C, Benedyk, Light Metals in Automotive Applications[J], Light Metal Age, 2000(10):34-35.
3. 王海亮, 基于耐撞性数值仿真的汽车车身结构优化设计研究, 博士学位论文, 上海交通大学, 2002.
4. Asim Karim, Hojjat Adeli, Global optimum design of cold-formed steel hat-shape beams, Thin-Walled Structures 35 (1999) 275-288
5. Heung-Soo Kim, Tomasz Wierzbicki, Effect of the cross-sectional shape of hat-type cross-sections on crash resistance of an "S"-frame, Thin-Walled Structures 39 (2001) 535-554.
6. Kim H-S, Wierzbicki T. Effect of the cross-sectional shape on crash behavior of a 3-D space frame. Impact and Crashworthiness Laboratory Report No. 34, May 2000, MIT.